



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Cavities for light and sound: a cavity-enhanced platform for quantum acoustics

Fisicaro, M.

Citation

Fisicaro, M. (2024, October 29). *Cavities for light and sound: a cavity-enhanced platform for quantum acoustics*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4106853>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/4106853>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Samenvatting

Akoestische oppervlaktegolven golven zijn mechanische golven die beperkt zijn tot het oppervlak van een materiaal. Deze golven komen van nature voor tijdens aardbevingen en zijn ook ontworpen voor gebruik in zeer kleine apparaten, waar ze een cruciale rol spelen bij het detecteren en verwerken van ultrahoogfrequente elektrische signalen. Kunstmatige akoestische oppervlaktegolven opereren doorgaans op frequenties van honderden MHz of hoger, met golflengtes op micrometerschaal en oppervlakteverplaatsingen van honderden picometers - vergelijkbaar met de grootte van een atoom.

De excitatie van deze golven kan worden gedaan via elektromechanische omzetting door een interdigitale transducer op een piëzo-elektrisch materiaal. Akoestische oppervlaktegolven kunnen zeer lage verliezen hebben wat, in combinatie met de mogelijkheid tot koppelen aan een aantal kwantumsystemen via deformatie- of elektrische velden in piëzo-elektrische materialen, recentelijk de verkenning van het veld van kwantumakoestiek mogelijk heeft gemaakt.

Deze koppeling is mogelijk op klassiek niveau, waarbij een groot aantal coherente fononen interacteren met het kwantumsysteem, alswel op kwantumniveau, waarbij het kwantumsysteem idealiter koppelt aan een enkel fonon. Dit is niet alleen van belang voor onderzoek in de kwantumfysica, maar ook voor toepassingen variërend van kwantumdetectie tot kwantumtransductie, waarbij een kwantumsignaal wordt omgezet van het ene type drager (bijv. foton) naar een ander (bijv. fonon).

In dit proefschrift werken we met oppervlakte-akoestische golven op GaAs, dat zowel een piëzo-elektrisch materiaal als een halfgeleider is. Op deze manier kunnen akoestische oppervlaktegolven worden gegenereerd in hetzelfde medium dat de optisch actieve kwantumstippen InGaAs herbergt. De koppeling tussen akoestische oppervlaktegolven en kwantumstippen kan worden versterkt door de fononen op te sluiten in een akoestische trillholte en de kwantumstip in een optische micro-trillholte te plaatsen om de optische uitlezing te verbeteren. Hiertoe beschrijven we hier de realisatie van een platform bestaande uit een akoestische trillholte en een open optische micro-trillholte, dat in de nabije toekomst zal worden gebruikt voor kwantumakoestische experimenten met gigahertz akoestische oppervlaktegolven en InGaAs-halfgeleider-kwantumstippen.

De fabricage van trillholtes voor akoestische oppervlaktegolven met hoge finesse is niet triviaal vanwege de vele verliesmechanismen die aanwezig zijn. Door de complexiteit van het systeem zijn eindige-elementensimulaties tijdrovend en niet eenvoudig uit te voeren. Daarom omvat de fabricage van trillholtes voor akoestische oppervlaktegolven met hoge finesse meestal een optimalisatieproces op basis van het iteratief fabriceren en karakteriseren van samples. In ons geval fabriceren we trillholtes voor akoestische oppervlaktegolven via elektronenbundellithografie en verdamping van Al op GaAs. Deze trillholtes werken op 1 GHz en bevatten een interdigitale transducer voor het exciteren van akoestische oppervlaktegolven.

In Hoofdstuk 2, dat zich richt op de karakterisering van trillholtes voor akoestische oppervlaktegolven, bouwen we een optische interferometer die gebaseerd is op glasvezel om de amplitude en fase van de verplaatsing van GHz akoestische oppervlaktegolven te meten, evenals hun ruimtelijke distributie in een akoestische trillholte in beeld te brengen.

Karakterisering van trilholttes voor akoestische oppervlaktegolven wordt meestal gedaan met volledig elektrische metingen met dezelfde interdigitale transducer die wordt gebruikt voor de excitatie van de golven. We constateren dat deze methode onvolledig is en kan leiden tot misleidende informatie, vooral met betrekking tot de verdeling van het akoestische veld in de trilholtte. We tonen dit aan door transversale modi in een trilholtte voor akoestische oppervlaktegolven in beeld te brengen en te laten zien dat de superpositie van deze modi leidt tot onconventionele profielen.

Een van de verliesmechanismen in trilholttes voor akoestische oppervlaktegolven is de verstrooiing van oppervlaktegolven naar bulkgolven door de spiegels voor akoestische oppervlaktegolven. In Hoofdstuk 3 onderzoeken we ongewenste akoestische bulkgolven in trilholttes voor akoestische oppervlaktegolven. Dit onderzoek is mogelijk geweest dankzij de hoge ruimtelijke resolutie van onze scannende interferometer, waarmee we de interferentiepatronen van akoestische golven in de trilholttes kunnen analyseren. We laten ook zien dat vanwege de interferentie tussen oppervlakte- en bulkgolven, metingen van alleen de amplitude van de oppervlakverplaatsing voldoende zijn om bulkgolven te detecteren. Deze methode kan waardevol zijn bij het onderzoeken van geometrieën die bulkgolferstrooiing minimaliseren.

Een bijzonder kenmerk van onze interferometer is de single-mode glasvezelsplitser. Dit leidde tot de onverwachte observatie van het dynamische Talbot-effect, waarbij de staande golven in trilholttes voor akoestische oppervlaktegolven zich gedragen als een oscillerend diffractierooster. Hierdoor worden oscillerende replica's van het optische veld bij het rooster geproduceerd op specifieke locaties van het rooster. In Hoofdstuk 4 rapporteren we de observatie en het onderzoek van dit fenomeen.

In Hoofdstuk 5 beschrijven we de realisatie van een optische micro-trilholtte met open toegang, compatibel met een gesloten-cyclus cryostaat die op tafel is geplaatst. De hoge mechanische stabiliteit van 5.7 pm rms, verkregen in een cryostaat bij 4 K, maakt stabiele werking van een trilholtte met finesse $F \sim 1800$ mogelijk. In het bijzonder heeft onze opstelling vrije optische toegang, wat essentieel is voor volledige polarisatiecontrole. Verstelbaarheid en een klein modusvolume maken het compatibel met halfgeleiderkwantumstippen.

Op het moment van schrijven van dit proefschrift wordt de trilholtte voor akoestische oppervlaktegolven geïntegreerd met de optische micro-trilholtte met open toegang. Hiervoor wordt een GaAs-substraat eerst gecoat met een AlAs/GaAs Bragg-spiegel, waarna een laag InGaAs-kwantumstippen wordt ingebed in het midden van een 260 nm dikke GaAs-laag. Dit optisch reflectieve GaAs-substraat vormt de vlakke spiegel van onze open optische micro-trilholtte. De optische micro-trilholtte heeft een modevolume $V \sim 10 \lambda^3$ ($\lambda = 935$ nm) en een finesse $F \sim 1800$, terwijl de trilholtte voor akoestische oppervlaktegolven (de korte trilholtte gepresenteerd in Hoofdstuk 3) een modevolume $V_{SAW} \sim 3500 \Lambda^3$ ($\Lambda = 2.8 \mu\text{m}$) heeft, en finesse $F_{SAW} \sim 40$ bij kamertemperatuur. Met deze parameters is de geschatte verplaatsing van een enkel fonon $U_0 \sim 0.01$ fm.

We zijn van plan om eerst de interactie tussen akoestische oppervlaktegolven en een kwantumstip in het klassieke regime te bestuderen, en vervolgens deze interactie te onderzoeken met oppervlaktegolven op kwantumniveau, idealiter met als doel een enkel fonon te detecteren door de modulatie van de frequentie van de kwantumstip te meten. Volgens onze schattingen is de detectie van een enkel fonon mogelijk, zelfs met onze trilholttes voor akoestische oppervlaktegolven die een relatief grote modevolume hebben, alhoewel daarvoor millikelvin-temperaturen nodig zijn om het akoestische systeem in de grondtoestand te brengen.